内外动机对青少年记忆的影响及其神经机制*

张明霞 [12] 李雨欣 [12] 李瑾 [3] 刘勋 [12]

([1] 中国科学院心理研究所，北京 100101) ([2] 中国科学院大学心理学系，北京 100049)

([3] 中国科学院自动化研究所，北京 100190)

摘 要 动机是一切行为的核心，动机可分为外在和内在动机。青少年时期既是记忆的关键期，也是动机发展的特殊时期。然而，目前关于内外动机影响青少年记忆的研究才刚刚起步，尚不清楚外在和内在动机影响青少年记忆的规律和机制是否一致，也不清楚二者如何交互影响记忆。本研究将结合认知范式和脑成像技术，考察外在和内在动机如何分别影响以及交互影响青少年记忆。这将有助于更加全面、深刻理解内外动机影响青少年记忆的独特规律和机制，为科学提升青少年动机和记忆效果提供研究证据。

关键词 外在动机，内在动机，记忆，青少年，神经机制

1 问题提出

动机是一切行为的核心，是心理和教育学关注的重点问题。如何激发动机、产生高效学习，关乎个人前途和国家发展。然而，由于对内外动机影响学习规律和机理认识不充分，我国教育过于重外而轻内，使得家庭和政府投入巨大，学生自主动机、内在兴趣和深度学习却并不如人意(Yu et al., 2018)。许多人质疑这对培养我国长远发展所需人才可能会产生十分不利影响。记忆是学习的关键认知加工过程。加强对内外动机影响记忆的规律和机理的探究，为提升学习质量和效率、培养人才提供科学依据，具有重要现实意义。

心理和教育领域关于内外动机的争议已有半个多世纪的历史。行为主义流派如 Skinner 等提倡通过外在强化（外在动机）来促进行为表现(Skinner, 1938, 1955)。而人本主义如 Deci 等推崇通过满足自主需求（内在动机）来提升行为表现，他们反对外在行为控制的方式，认为其对内在自主动机有破坏作用(Deci, 1971; Ryan & Deci, 2020)。传统行为研究限制了人们对动机影响行为内在机制的认识，使得这场争论在上世纪末陷入瓶颈。利用最新脑成像技术

收稿日期：2022-03-21

*国家自然科学基金(62177045, 31500888)

通信作者：张明霞，Email：zhangmx@psych.ac.cn

直接解析内外动机影响记忆的神经机制、认识内外动机影响记忆的本质，为解决学界争议提供新的证据和视角，具有重要理论意义。

青少年期是指从青春期开始到成年独立的人生阶段，这一“疾风暴雨”的时期被认为是人生的第二个关键发展期(Fuhrmann et al., 2015)，具有独特的生理、心理特点。大脑的迅速发展使得这一时期记忆快速增长，成为学习的关键阶段。这一时期也是动机发展的特殊时期，动机各子系统发展的不平衡（奖赏系统的高敏感和控制系统的尚未成熟）使得这一时期成为许多适应不良行为（如，成瘾、过度冒险行为）的高发期。系统考察青少年时期内外动机影响记忆的独特规律和机理，从而引导青少年进行适应性行为、利用好学习关键期，具有重要教育意义。

在此背景下，本项目围绕“内外动机”与“青少年记忆”这一主题展开。系统揭示内外动机影响青少年记忆的独特行为规律和神经机理，可以帮助我们合理激发动机，减少可能损害青少年动机的因素，创设能使青少年有效学习的环境。同时，也有助于我们认识不同动机对记忆影响的本质，认识动机系统与记忆系统之间的交互影响，帮助我们理解人脑活动的模式。

2 研究现状

2.1 内外动机的相关理论

不同领域对动机的定义和理解并不完全相同。传统心理学把动机定义为激发和维持个体进行活动，并导致该活动朝向某一目标的心理倾向或动力(Hull, 1943)。当个体从事活动是为了获得外物（如金钱）带来的愉悦，则是由外在动机所推动；而当个体从事活动是由于活动本身所带来的愉悦，是为了满足人类基本心理需求（如自主性），则是由内在动机所推动(Ryan & Deci, 2000a)。

心理领域对如何提升动机和行为表现的探究已经历了上百年的历史，学界有不同理论和主张。行为主义流派 Skinner 等提出的强化理论提倡以外在强化的方式（外在动机）来促进行为表现(Skinner, 1938, 1955)。强化理论认为，正强化（奖赏）增加行为动机和发生频率，负强化（惩罚）则减弱行为动机和发生频率，可以通过这两种方式改变行为表现。而人本主义流派 Deci 等提出的自我决定理论提倡通过激发个体自主性（内在动机）来提升行为表现(Ryan & Deci, 2000b)。他们主张慎用外在激励，认为外在动机会破坏内在动机(Deci, 1971)。自我决定理论认为，人类具有自主、胜任和关系三大基本心理需求，我们有天然的动力（内在动机）去进行活动来满足这三大需求。自主性/自我决定（autonomy/self-determination）是

内在动机的核心要素。外在奖励会使人将行为目的归为外因、受外物所控，以至丧失自主动机。

至今，近十项研究对数百篇关于内外动机如何分别以及交互影响行为的文献进行元分析，得到的结论并不一致。Deci 等人(1999)的元分析显示外在奖赏对内在动机和行为表现有负面影响，而 Cameron 等人（1994）却显示奖赏并不会降低内在动机和行为表现(Cameron & Pierce, 1994; Eisenberger et al., 1999)。最新有研究对四十年来近两百篇文献进行元分析，结果显示内外动机共同促进行为表现，对不同任务的影响不同(Cerasoli et al., 2014)。

值得一提的是，早在二十世纪初开始，我国研究者就开始关注内外动机的关系(张剑, 郭德俊, 2003)及二者对学业成就的影响。采用问卷调查的方式，我国研究者进行了多项研究，比较一致的发现内在动机与学业成就呈正相关(梁海梅等, 1998; 王振宏, 刘萍, 2000; 张丹慧等, 2018)；而外在动机与学业成绩的关系还有一定争议，有研究发现二者呈负相关(王振宏, 刘萍, 2000; 曾细花, 王耘, 2011)，也有研究发现二者成正相关(周园, 2016)。近几年，我国研究者还采用认知范式，考察内外动机对任务的影响，发现二者都促进了相关任务的表现(Cheng et al., 2020; Qin et al., 2021; Qin et al., 2020; Wu et al., 2021; Zhang et al., 2017)。Qin 等(2020)还发现，外在金钱奖赏提升了相关任务的表现，却降低了无关任务的表现。这可能是外在奖赏破坏了内在动机，从而降低了非奖赏任务的表现，表明内外动机会交互影响行为表现(Qin et al., 2020)。

2.2 内外动机的神经机制

认知神经科学家把动机看作是个体由于期待奖赏而付出努力去获取奖赏结果的一系列认知加工过程(Dickerson & Adcock, 2018)。奖赏既可以是金钱、物质、荣誉（外在动机）(Kim, 2013)，也可以是内在的自主性、好奇心、兴趣等（内在动机）(Di Domenico & Ryan, 2017)。

外在动机加工过程可能卷入了奖赏、价值和控制系统。过往研究提出，外在动机涉及复杂的认知、情感加工过程，卷入了多个脑结构、神经递质（多巴胺）和通路（中脑边缘、中脑皮层通路）(Reeve &Lee, 2019)。外在动机加工主要涉及三大认知过程和参与系统(Kim, 2013; 姜怡, 2016)：一是动机产生过程，包括奖赏预期、自动化行为驱动等认知加工，卷入了包括腹侧纹状体在内的奖赏系统；二是动机维持过程，包括价值计算、基于价值的决策等认知加工，卷入了包括眶额皮层在内的价值系统；三是动机执行过程，包括计划、行为监控、目标导向注意等认知加工，卷入了包括背外侧前额叶在内的控制系统。

内在动机可能也卷入了奖赏、价值和控制系统，目前尚不清楚内外动机加工的机制具体有何异同。近年来，研究者通过自主选择/决定来操纵自主动机，发现当被试可以自主选择/

决定时，相比被迫选择，奖赏和价值区域（如纹状体、眶额皮层）得到更强激活(Leotti & Delgado, 2011; Meng & Ma, 2015; Murayama et al., 2015)。也有研究者探测到脑岛是任务中自发满足感和愉悦感的关键区域(Lee & Reeve, 2017)。脑岛是大脑中两大网络——中央执行网络和默认网络的中心节点(Di Domenico & Ryan, 2017)，中央执行网络提示内在动机卷入了控制系统；默认网络被认为与静息状态下的内化、自我认知有关，提示内在动机可能卷入了自我加工系统，这在外在动机研究中尚未被报道。

2.3 内外动机影响记忆的神经机制

金钱奖赏便于操作、量化，是研究中诱发外在动机最常用手段(Cheng et al., 2020; Qin et al., 2021; Qin et al., 2020; Zhang et al., 2017)。自主动机是内在动机的核心概念，常用自主选择/决定来诱发，是近年来的研究热点。本项目的外在动机将聚焦于金钱奖赏，内在动机将聚焦于自主选择。

金钱奖赏（外在动机）影响记忆的神经机制研究目前已经取得了较为丰富的成果。金钱奖赏可能通过动机与记忆系统的交互作用影响记忆效果。研究发现，腹侧纹状体等组成的奖赏系统跟海马记忆系统之间具有功能和结构性的连接(Shohamy & Adcock, 2010)，这可能是奖赏影响记忆的关键生理基础。奖赏对记忆的影响可以发生在编码和巩固两个阶段。在编码阶段，奖赏预期引发自动化行为驱动（奖赏系统卷入）(Adcock et al., 2006)，再经过价值计算、决策（价值系统卷入），个体会将注意和认知资源有意识地分配给奖赏项目，且对其使用更多的记忆策略（控制系统卷入）(Cohen et al., 2014, 2016)，使得奖赏项目能更好地编码进记忆系统，取得更好的记忆效果(Ariel & Castel, 2014; Elliott et al., 2019; Madan & Spetch, 2012; Shohamy & Adcock, 2010)。在编码阶段，个体对记忆项目不会进行价值计算、有意注意和目标导向的认知控制，奖赏诱发的多巴胺神经递质不通过价值和控制系统就直接影响记忆系统，提升记忆效果，主要是提升长时记忆效果(Murayama & Kitagami, 2014; Patil et al., 2017; Gruber et al., 2016)。

自主选择/决定（内在动机）影响记忆的神经机制目前研究数量还较少。自主选择/决定可能也是通过动机和记忆系统的交互作用影响记忆效果。Voss 等人（2011）首次考察了自主选择/决定对记忆影响的神经机制，发现自主条件相较于被动条件，大脑控制系统（背外侧前额叶）与记忆系统（海马）功能连接更强(Voss et al., 2011)，记忆效果更好。在这种范式中，自主选择/决定能影响记忆过程（如，各项目的记忆顺序和时间），因此可能不是自主选择/决定，而是两种条件下不同的记忆过程影响了记忆效果。Murty 等人随后设计了另一种范式，将自主选择和被迫选择两种条件在记忆内容和时间上都进行了匹配，使得被试的自主

选择/决定无法影响记忆过程，在这种范式中依然出现了记忆的自主选择效应(Murty et al., 2015, 2019)，并且发现自主选择/决定是通过纹状体与海马在编码和巩固阶段的交互作用影响记忆效果 (Murty et al., 2015; Murty et al., 2019)。

2.4 青少年记忆、动机和脑发育

青少年时期一般是指成年以前 11、12 岁到 18、19 岁的青春发育期(Casey, 2015)。这一时期各项认知能力快速增长，尤其是记忆快速增长，是学习的关键时期。研究发现，人们对青少年时期各类事件（包括自传体事件、公共事件等）的回忆优于人生的其他时期，表明这一时期的记忆能力正快速增强(Fuhrmann et al., 2015)；其他方面的记忆（言语和视觉空间记忆）也在这一时期达到峰值(Murre et al., 2013)。这一时期记忆的发展与大脑发育密不可分。青少年时期大脑经历着突触精简及髓鞘化的过程，突触精简使得灰质体积和厚度减小，髓鞘化使得白质体积和密度上升，这些生理机制带来了青少年时期整体信息处理能力和记忆能力的快速增长(Mills &Tamnes, 2014; Wierenga et al., 2014; 鞠恩霞等, 2010)。这些变化在额叶、顶叶和颞叶尤为明显(Fuhrmann et al., 2015)，其中，额顶网络的发展使得记忆所需的策略加工、注意力得以提升，而内侧颞叶的发展使得记忆内容的储存得以提升(Ofen, 2012)。

青少年时期具有强烈的奖赏寻求和自主需求，认知控制却尚不完善，是动机发展的特殊时期。采用问卷和认知范式，以往研究发现奖赏寻求从儿童到成人呈倒 U 型发展模式，在青少年时期（14 岁左右）达到顶峰(Steinberg et al., 2009; Smith et al., 2012)。青少年时期强烈的奖赏寻求与奖赏系统发育特点有关：中脑多巴胺系统对奖赏刺激的敏感性发展可能成倒 U 型模式，在青少年时期达到顶峰(Galván, 2013; Casey, 2015; Murty et al., 2018; Somerville & Casey, 2010)。青少年时期不仅对外在奖赏追求增强，内在自主需求也迅速发展。这一时期父母权威影响逐渐减低，自主决定增加(Keijsers & Poulin, 2013; Steinberg & Silverberg, 1986; Wehmeyer & Shogren, 2017; 吴波, 方晓义, 李一飞, 2003)。目前对青少年自主性的考察主要是从发展教育和社会心理的角度，对其认知神经基础的探究几乎空白，尚不清楚这一时期自主动机的增强是否也与奖赏系统的发展有关。与奖赏系统在青少年时期发展到顶峰的模式不同，认知控制系统（如，前额叶）在青少年时期发育尚未成熟(Casey, 2015; Somerville & Casey, 2010)。奖赏和控制系统的发展又进而影响青少年价值系统的功能(Davidow et al., 2018)，使得青少年时期动机呈现独特特点(Gee et al., 2018)。

近年来，研究者开始关注青少年时期动机对记忆的影响，结果提示青少年时期动机对记忆的影响可能呈现独特的模式。相比以往研究强调这一时期特殊的脑发育（奖赏系统的过度敏感和控制系统的尚不成熟导致动机系统的失衡）引起适应不良行为的高发(Defoe et al.,

2015; Somerville & Casey, 2010)，近年来关注青少年发展的研究者提出，这一时期的生理心理特点（如高奖赏敏感性）在提升记忆、促进学习、帮助青少年走向独立方面，具有适应性意义(Casey, 2015)。近期一项发表在 Neuron 上的研究发现，青少年在强化学习中比成人表现更好，同时对接收正强化时呈现的材料记忆效果更好，这种效应跟青少年时期奖赏和记忆系统（纹状体和海马）具有更强功能连接有关(Davidow et al., 2016)。研究者提出，多巴胺奖赏系统在青少年期的发展，通过作用于海马，促进奖赏相关的记忆(Murty et al., 2016)。

2.5 对研究现状的思考

首先，学界对外在动机机制的研究较多，而对内在动机机制的理解和认识还并不充分。虽然已有研究报告内外动机都卷入了相似的三大系统（奖赏、价值和控制系统），但缺少对二者神经机制的直接分析和比较，并不清楚在这三大系统内部，内外动机的神经机制是否存在分离，也不清楚其他加工系统，如自我系统是否特异性卷入内在动机加工过程中。

此外，学界缺少对内外动机影响记忆的认知神经机制的系统分析和比较。虽然已有研究报告金钱奖赏和自主选择可能都通过动机和记忆系统交互作用影响记忆效果，都可以发生在编码和巩固阶段，但并不清楚两种动机影响记忆的机制是否一致、二者如何交互影响记忆。

最后，学界大多关注成人，缺少对青少年时期动机影响记忆的规律和机制的考察。虽然少量研究关注了青少年时期奖赏与记忆系统的交互作用，但对青少年时期动机如何通过动机多个子系统作用于记忆系统从而影响记忆效果还知之甚少，对青少年时期内外动机影响记忆的行为模式和神经机制缺乏系统探究和比较。

3 研究构想

基于对研究现状的分析和思考，本项目将通过一系列研究，对比成人和青少年，揭示青少年时期内外动机影响记忆的独特行为规律和神经机理。传统脑成像研究比较注重对局部脑区激活强度进行分析，本项目拟采用神经表征分布模式、脑网络分析等先进方法分析脑区内信息表征的空间分布模式以及不同脑区间的动态交互模式。具体而言，本项目将结合认知范式和脑成像手段，通过金钱奖赏和自主选择操纵外在和内在动机，分别考察外在动机影响青少年记忆的认知神经机制（研究一）、内在动机影响青少年记忆的认知神经机制（研究二）、外在动机下，内在动机影响青少年记忆的认知神经机制（研究三）。

3.1 研究一：外在动机影响记忆的认知神经机制

本研究通过金钱奖赏操纵外在动机，考察外在动机影响记忆的认知行为和神经机制，比较对成人和青少年影响的模式是否一致。大量研究表明外在动机主要影响长时后测而不是立

即后测的记忆效果(Adcock et al., 2006; Gruber et al., 2016; Murayama & Kitagami, 2014；Cheng et al., 2020)，因此本研究行为层面主要关注外在动机对 24 小时后测记忆效果的影响。本研究神经层面主要关注编码和巩固阶段，动机系统（奖赏、价值和控制系统）和海马记忆系统的脑区内加工模式（包括激活强度和空间分布模式）、脑区间交互活动模式以及神经模式与行为效应的关系。

3.2 研究二：内在动机影响记忆的认知神经机制

本研究通过自主选择/决定操纵内在动机，考察内在动机影响记忆的认知行为和神经机制，比较对成人和青少年影响的模式是否一致。前人研究揭示了自主选择/决定对 24 小时后测记忆效果的影响(Murty et al., 2015, 2019)，因此，本研究与研究一保持一致，行为层面也主要关注内在动机对 24 小时后测记忆效果的影响。本研究神经层面主要关注编码和巩固阶段，奖赏、价值和控制系统、自我加工系统和海马记忆系统的脑区内加工模式、脑区间交互活动模式以及神经模式与行为效应的关系。结合研究二与研究一（外在 vs. 内在），揭示外在和内在动机影响记忆的共通性和特异性神经机制。

3.3 研究三：外在动机下，内在动机影响记忆的认知神经机制

本研究通过自主选择/决定操纵内在动机，同时通过金钱奖赏激发外在动机。考察外在动机下，内外动机影响记忆的认知行为和神经机制，比较对成人和青少年影响的模式是否一致。与研究一、二保持一致，本研究行为上主要关注外在动机下，内在动机如何影响 24 小时后测记忆效果。本研究神经层面主要关注编码和巩固阶段，动机系统和记忆系统的脑区内加工模式、脑区间交互活动模式以及神经模式与行为效应的关系。研究三与研究二结合（无外在动机下内在动机的作用 vs. 有外在动机下内在动机的作用）将揭示内外动机交互影响记忆的认知神经机制。

4 理论构建与创新

首先，以往研究多关注外在动机影响记忆的行为和神经机制，近来领域内研究者开始关注内在动机影响记忆的机制。动机加工卷入了奖赏、价值和控制系统，与记忆系统交互作用影响记忆效果。但目前尚不清楚内外动机加工卷入了哪些共通性和特异性的神经机制，缺少对这两种动机影响记忆机制的对比，也缺少对两种动机交互影响记忆的探讨。本项目的第一大特色和创新之处在于系统揭示内外动机对记忆的影响（图 1），包括直接比较外在和内在动机影响记忆的机制，以及考察外在和内在动机如何交互影响记忆的机制。这对于我们理解动机的本质、认识动机影响记忆的内在机理有重要的理论意义。

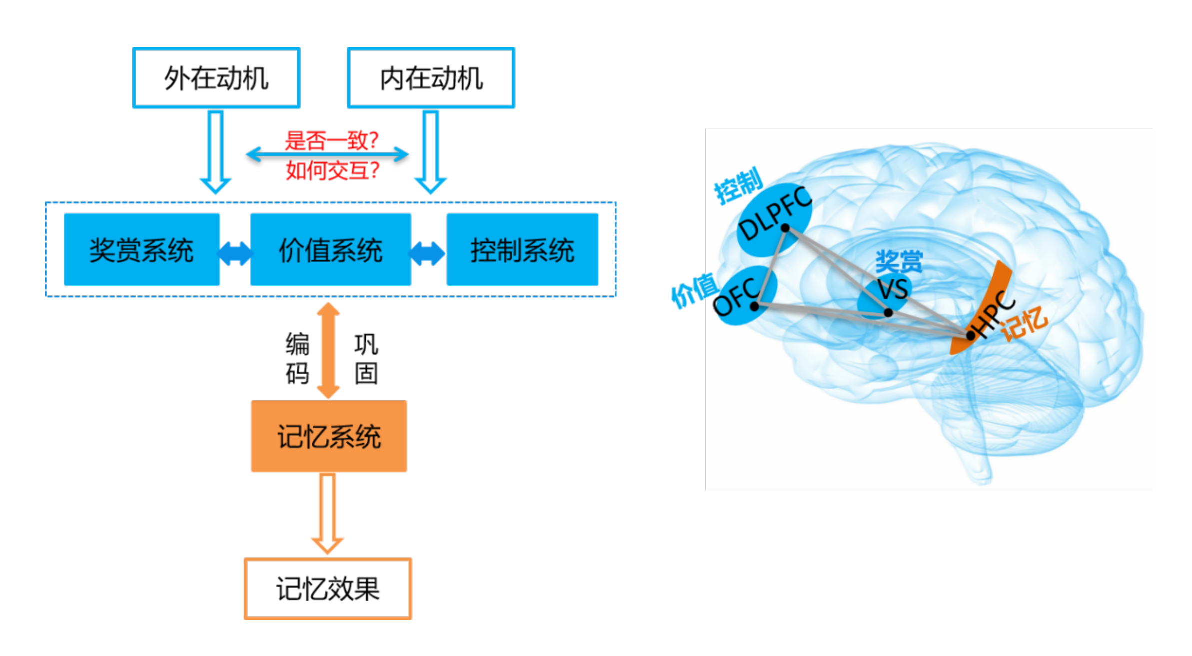


图 1 动机影响记忆的认知神经机制

（蓝色区域为动机系统（包括奖赏、价值、控制系统），橘色区域为记忆系统，VS=腹侧纹状体，OFC=眶额皮层，DLPFC=背外侧前额叶，HPC=海马）

其次，青少年时期大脑各系统（动机和记忆系统）的发育特点使得这一时期成为动机发展的特殊时期和记忆的关键期。以往研究更多关注青少年特殊的动机特点引发的适应不良行为，较少考察青少年时期独特的动机特点如何影响记忆（学习的核心认知加工过程）。根据前人研究(Casey, 2015; Murty et al., 2016; Somerville & Casey, 2010)，我们总结出动机关键脑区（如控制相关的前额叶和奖赏相关的纹状体）以及记忆关键脑区（如海马）的功能发育规律（图 2），但尚不清楚青少年时期动机和记忆系统如何相互作用从而影响记忆效果。本项目的第二大特色和创新之处在于揭示内外动机对青少年（相比成人）记忆影响的独特规律和机理。这对于我们理解动机影响记忆的发展规律，理解青少年脑发育有重要理论意义。

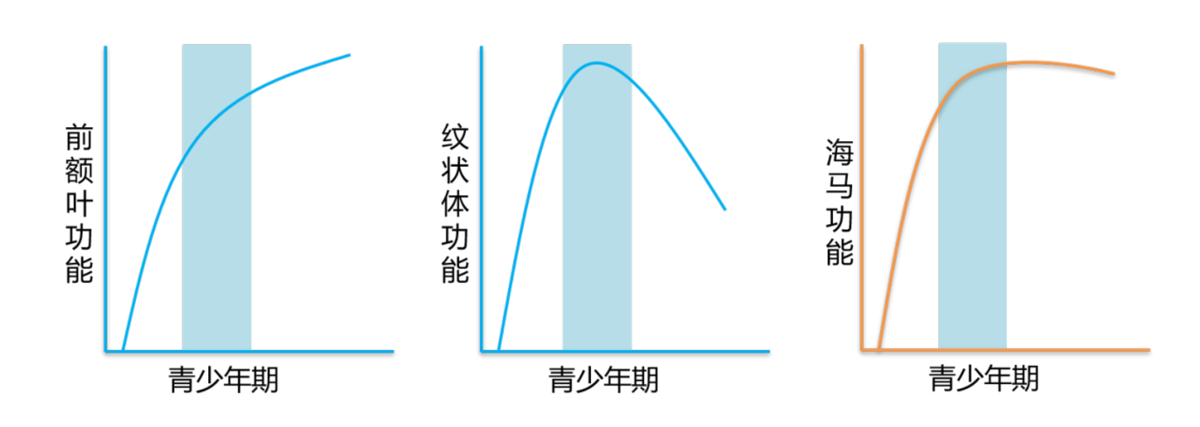


图 2 动机及记忆关键脑区的功能发育曲线

最后，以往研究大多从单一角度考察动机对记忆的影响。本项目的第三大特色和创新之处在于整合了心理和神经科学研究方法，从认知行为、神经回路、神经系统和脑网络多个层面系统研究内外动机对青少年记忆的影响。这将极大丰富本领域研究的技术手段和提高本领域研究层次，研究结果有利于我们全面了解动机对青少年记忆影响的规律和机制。

参考文献

姜怡. (2016). 动机的神经机制. *教育生物学杂志*, *4*(4), 194–202.

鞠恩霞, 李红, 龙长权, 袁加锦. (2010). 基于神经成像技术的青少年大脑发育研究. *心理科学进展*, *18*(06), 907–913.

梁海梅, 郭德俊, 张贵良. (1998). 成就目标对青少年成就动机和学业成就影响的研究. *心理科学*, *21*(5), 332–335.

王振宏, 刘萍. (2000). 动机因素、学习策略、智力水平对学生学业成就的影响. *心理学报*, *32*(1), 65–69.

吴波, 方晓义, 李一飞. (2003). 青少年自主研究综述. *心理发展与教育*, *19*(1), 89–96.

曾细花, 王耘. (2011). 初中生英语学习动机、学习行为和成绩的关系研究. *教学与管理*, *21*, 76–77.

张丹慧, 符定梦, 刘红云, 刘鲁曼. (2018). 学生感知教师自主支持对学生学业成绩的影响: 自主心理需要, 内部动机的中介作用. *教师教育研究*, *30*(1), 8.

张剑, 郭德俊. (2003). 内部动机与外部动机的关系. *心理科学进展*, *11*(5), 545–550.

周园. (2016). 高中生外部动机、自我效能感和自主性的关系及其对学业成绩的影响——基于中部地区某市 46 所中学的纵向数据. *教育测量与评价*, *7*, 60–64.

Adcock, R.A., Thangavel, A., Whitfield-Gabrieli, S., Knutson, B., & Gabrieli, J.D. (2006). Reward-motivated learning: Mesolimbic activation precedes memory formation. *Neuron*, *50*(3), 507–517.

Ariel, R., & Castel, A.D. (2014). Eyes wide open: Enhanced pupil dilation when selectively studying important information. *Experimental Brain Research*, *232*(1), 337–344.

Cameron, J., & Pierce, W.D. (1994). Reinforcement, reward, and intrinsic motivation: A meta-analysis. *Review of Educational research*, *64*(3), 363–423.

Casey, B.J. (2015). Beyond simple models of self-control to circuit-based accounts of adolescent behavior. *Annual Review of Psychology*, *66*(1), 295–319.

Cerasoli, C.P., Nicklin, J.M., & Ford, M.T. (2014). Intrinsic motivation and extrinsic incentives jointly predict performance: A 40-year meta-analysis. *Psychological Bulletin*, *140*(4), 980–1008.

Cheng, S., Jiang, T., Xue, J., Wang, S., Chen, C., & Zhang, M. (2020). The influence of rewards on incidental memory: More does not mean better. *Learning and Memory*, *27*(11), 462–466.

Cohen, M.S., Rissman, J., Suthana, N.A., Castel, A.D., & Knowlton, B.J. (2014). Value-based modulation of memory encoding involves strategic engagement of fronto-temporal semantic processing regions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *14*(2), 578–592.

Cohen, M.S., Rissman, J., Suthana, N.A., Castel, A.D., Knowlton, B.J. (2016). Effects of aging on value-directed modulation of semantic network activity during verbal learning. *Neuroimage*, *125*, 1046–1062.

Davidow, J.Y., Foerde, K., Galvan, A., & Shohamy, D. (2016). An upside to reward sensitivity: The hippocampus supports enhanced reinforcement learning in adolescence. *Neuron*, *92*(1), 93–99.

Davidow, J.Y., Insel, C., & Somerville, L.H. (2018). Adolescent development of value-guided goal pursuit. *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(8), 725–736.

Deci, E.L. (1971). Effects of externally mediated rewards on intrinsic motivation. *Journal of Personality and Social Psychology*, *18*(1), 105–115.

Deci, E.L., Koestner, R., & Ryan, R.M. (1999). A meta-analytic review of experiments examining the effects of extrinsic rewards on intrinsic motivation. *Psychological Bulletin*, *125*(6), 627–668; discussion 692–700.

Defoe, I.N., Dubas, J.S., Figner, B., & van Aken, M.A. (2015). A meta-analysis on age differences in risky decision making: Adolescents versus children and adults. *Psychological Bulletin*, *141*(1), 48–84.

Di Domenico, S.I., & Ryan, R.M. (2017). The emerging neuroscience of intrinsic motivation: A new frontier in self-determination research. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 145.

Dickerson, K.C., & Adcock, R.A. (2018). Motivation and memory. In J. T. Wixted (Ed-in-Chief.), E.A. Phelps (Vol. Ed) & L.Davachi (Vol. Ed), *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive Neuroscience: Vol.1. Learning and Memory* (4th Ed.). (pp.215–150). New York: John Wiley & Sons.

Eisenberger, R., Pierce, W.D., & Cameron, J. (1999). Effects of reward on intrinsic motivation-negative, neutral and positive: Comment on Deci, Koestner, and Ryan (1999). *Psychological Bulletin*, *125*(6), 677–691; discussion 692–700.

Elliott, B.L., Blais, C., McClure, S.M., & Brewer, G.A. (2019). Neural correlates underlying the effect of reward value on recognition memory. *Neuroimage*, *206*, 116296.

Fuhrmann, D., Knoll, L.J., & Blakemore, S.J. (2015). Adolescence as a sensitive period of brain development. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(10), 558–566.

Galván, A. (2013). The teenage brain: Sensitivity to rewards. *Current Directions in Psychological Science*, *22*(2), 88–93.

Gee, D.G., Bath, K.G., Johnson, C.M., Meyer, H.C., Murty, V.P., van den Bos, W., & Hartley, C.A. (2018). Neurocognitive development of motivated behavior: Dynamic changes across childhood and adolescence. *The Journal of Neuroscience*, *38*(44), 9433–9445.

Gruber, M.J., Ritchey, M., Wang, S.F., Doss, M.K., & Ranganath, C. (2016). Post-learning hippocampal dynamics promote preferential retention of rewarding events. *Neuron*, *89*(5), 1110–1120.

Hull, C.L. (1943). *Principles of behavior*. New York: Appleton-century-crofts.

Keijsers, L., & Poulin, F. (2013). Developmental changes in parent-child communication throughout adolescence. *Developmental Psychology*, *49*(12), 2301–2308.

Kim, S.I. (2013). Neuroscientific model of motivational process. *Frontiers in Psychology*, *4*, 98.

Lee, W., & Reeve, J. (2017). Identifying the neural substrates of intrinsic motivation during task performance. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *17*(5), 939–953.

Leotti, L.A., & Delgado, M.R. (2011). The inherent reward of choice. *Psychological Science*, *22*(10), 1310–1318.

Madan, C.R., & Spetch, M.L. (2012). Is the enhancement of memory due to reward driven by value or salience? *Acta Psychologica*, *139*(2), 343–349.

Meng, L., & Ma, Q. (2015). Live as we choose: The role of autonomy support in facilitating intrinsic motivation. *International Journal of Psychophysiology*, *98*(3), 441–447.

Mills, K.L., & Tamnes, C.K. (2014). Methods and considerations for longitudinal structural brain imaging analysis across development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *9*, 172–190.

Murayama, K., & Kitagami, S. (2014). Consolidation power of extrinsic rewards: Reward cues enhance long-term memory for irrelevant past events. *Journal of Experimental Psychology*, *143*(1), 15–20.

Murayama, K., Matsumoto, M., Izuma, K., Sugiura, A., Ryan, R.M., Deci, E.L., & Matsumoto, K. (2015). How self-determined choice facilitates performance: A key role of the ventromedial prefrontal cortex. *Cerebral Cortex*, *25*(5), 1241–1251.

Murre, J.M., Janssen, S.M., Rouw, R., & Meeter, M. (2013). The rise and fall of immediate and delayed memory for verbal and visuospatial information from late childhood to late adulthood. *Acta Psychologica*, *142*(1), 96–107.

Murty, V.P., Calabro, F., & Luna, B. (2016). The role of experience in adolescent cognitive development: Integration of executive, memory, and mesolimbic systems. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *70*, 46–58.

Murty, V.P., DuBrow, S., & Davachi, L. (2015). The simple act of choosing influences declarative memory. *Journal of Neuroscience*, *35*(16), 6255–6264.

Murty, V.P., DuBrow, S., Davachi, L. (2019). Decision-making increases episodic memory via postencoding consolidation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *31*(9), 1308–1317.

Murty, V.P., Shah, H., Montez, D., Foran, W., Calabro, F., & Luna, B. (2018). Age-related trajectories of functional coupling between the VTA and nucleus accumbens depend on motivational state. *The Journal of Neuroscience*, *38*(34), 7420–7427.

Ofen, N. (2012). The development of neural correlates for memory formation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *36*(7), 1708–1717.

Patil, A., Murty, V.P., Dunsmoor, J.E., Phelps, E.A., & Davachi, L. (2017). Reward retroactively enhances memory consolidation for related items. *Learning & Memory*, *24*(1), 65–69.

Qin, N., Gu, R., Xue, J., Chen, C., & Zhang, M. (2021). Reward-driven attention alters perceived salience. *Journal of Vision*, *21*(1), 7.

Qin, N., Xue, J., Chen, C., & Zhang, M. (2020). The bright and dark sides of performance-dependent monetary rewards: Evidence from visual perception tasks. *Cognitive Science*, *44*(3), e12825.

Reeve, J., & Lee, W. (2019). Motivational neuroscience. In R.M. Ryan (Eds.), *The Oxford handbook of human motivation* (pp.355–371). New York: Oxford University Press.

Ryan, R.M., & Deci, E.L. (2000a). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, *25*, 54–67.

Ryan, R.M., & Deci, E.L., (2000b). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, *55*(1), 68–78.

Ryan, R.M., & Deci, E.L. (2020). Intrinsic and extrinsic motivation from a self-determination theory perspective: Definitions, theory, practices, and future directions. *Contemporary Educational Psychology*, *61*, 101860.

Shohamy, D., & Adcock, R.A. (2010). Dopamine and adaptive memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(10), 464–472.

Skinner, B.F. (1938). *The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis*. New York: Appleton-Century.

Skinner, B.F. (1955). The control of human behavior. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, *17*(7), 547–551.

Smith, D.G., Xiao, L., Bechara, A. (2012). Decision making in children and adolescents: Impaired iowa gambling task performance in early adolescence. *Developmental Psychology*, *48*(4), 1180–1187.

Somerville, L.H., & Casey, B.J. (2010). Developmental neurobiology of cognitive control and motivational systems. *Current Opinion in Neurobiology*, *20*(2) 20, 236–241.

Steinberg, L., Graham, S., O'Brien, L., Woolard, J., Cauffman, E., & Banich, M. (2009). Age differences in future orientation and delay discounting. *Child Development*, *80*(1), 28–44.

Steinberg, L., & Silverberg, S.B. (1986). The vicissitudes of autonomy in early adolescence, *Child Development*, *57*(4), 841–851.

Voss, J.L., Gonsalves, B.D., Federmeier, K.D., Tranel, D., & Cohen, N.J. (2011). Hippocampal brain-network coordination during volitional exploratory behavior enhances learning. *Nature Neuroscience*, *14*(1), 115–120.

Wehmeyer M.L., & Shogren K.A. (2017). The development of self-determination during adolescence. In M. Wehmeyer, K. Shogren, T. Little, & S. Lopez (Eds.), *Development of Self-Determination Through the Life-Course*(pp. 89–98). Dordrecht: Springer.

Wierenga, L., Langen, M., Ambrosino, S., van Dijk, S., Oranje, B., & Durston, S. (2014). Typical development of basal ganglia, hippocampus, amygdala and cerebellum from age 7 to 24. *Neuroimage*, *96*, 67–72.

Wu, Q., He, Y., Luo, Y., Hughes, B.L., Jiang, C., & Chen, X. (2021). Self-choice preference: The propensity to under-delegate irrespective of sense of control. *Acta Psychologica*, *214*(18), 103262.

Yu, S., Chen, B., Levesque-Bristol, C., & Vansteenkiste, M. (2018). Chinese education examined via the lens of self-determination. *Educational Psychology Review*, *30*, 177–214.

Zhang, M., Tu, J., Dong, B., Chen, C., & Bao, M. (2017). Preliminary evidence for a role of the personality trait in visual perceptual learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, *139*, 22–27.

The influence of extrinsic and intrinsic motivation on memory in adolescents and the underlying neural mechanisms

ZHANG Mingxia[1,2], LI Yuxin[1,2], LI JIN[3], LIU Xun[1,2]

([1]Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

([2]Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

([3]Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Motivation is crucial to behavior. Motivation can be classified as extrinsic and intrinsic motivation. Adolescence is a critical period of memory and a special period of motivation development. However, the investigation of how extrinsic and intrinsic motivation impact memory is on the start stage. It remains unclear whether the rules and mechanisms of extrinsic and intrinsic motivation' impact on memory are common or specific and how the extrinsic and intrinsic motivation interacts with each other to impact memory. This proposed project will combine the cognitive paradigm and functional magnetic resonance imaging technology to investigate how extrinsic and intrinsic motivation separately influences and interacts with each other to influence adolescents' memory. These evidences will comprehensively and significantly advance our understanding of the unique laws and mechanisms of how extrinsic and intrinsic motivation affect memory in adolescents, and provide scientific evidence for how to improve the motivation and memory in adolescents.

Key words: extrinsic motivation, intrinsic motivation, memory, adolescents, neural mechanisms